



Diqiu Wuli Cejing
Xueshu Lunwenji

地球物理测井 学术论文集

——庆祝李舟波教授从事地球物理测井工作50周年

梅忠武 潘保芝 陆敬安 编

石油工业出版社

地球物理测井学术论文集

——庆祝李舟波教授从事地球物理测井工作 50 周年

梅忠武 潘保芝 陆敬安 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书包括与地球物理测井相关的论文 26 篇, 内容涉及测井方法理论、技术和解释等多个方面。

本书可以供从事地球物理测井工作的技术和研究人员参考, 也可以作为高等院校有关专业师生的参考书籍。

图书在版编目 (CIP) 数据

地球物理测井学术论文集: 庆祝李舟波教授从事
地球物理测井工作 50 周年/梅忠武等编.

北京: 石油工业出版社, 2003.7

ISBN 7-5021-4274-6

I. 地…

II. 梅…

III. 油气测井-文集

IV. TE151-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 044603 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

782×1092 毫米 16 开本 12.75 印张 2 插页 317 千字 印 1-800

2003 年 7 月北京第 1 版 2003 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-4274-6/TE·3002

定价: 30.00 元



李 舟 波 教 授



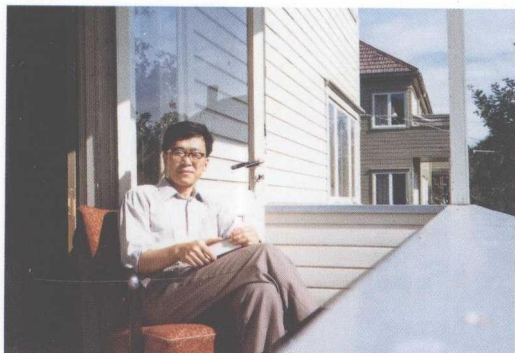
大学时代



研究生时期
与前苏联
导师合影



20 世纪 70 年代



挪威进修期间在住所门前



在挪威特隆赫姆大学 NTH 校园



担任长春地质学院副院长期间主持世行
贷款设备验收签字仪式



担任长春地质学院副院长期间主持会议



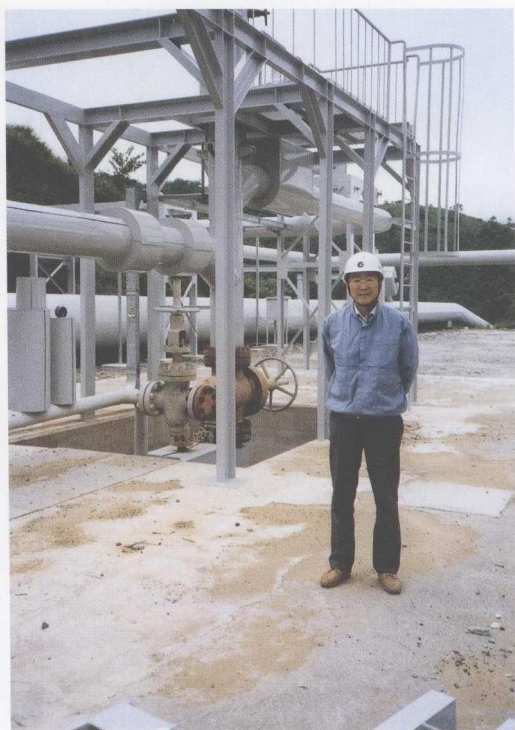
在德国下萨克森州访问



在美国蒙塔那矿业学院讲学



在日本九州大学访问



在日本地热田考察



参加国际测井学术讨论会



参加“八五”国家重点攻关项目
会议期间在四川留影



参加“八五”国家自然科学基金
重大项目油储宁波会议



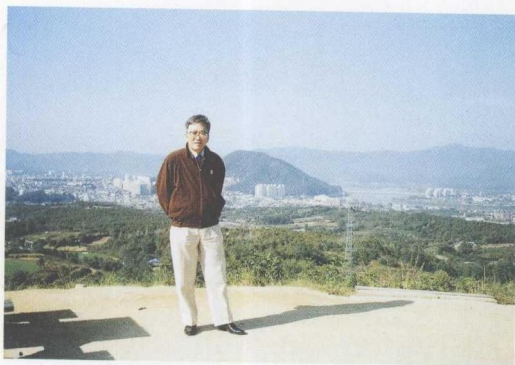
参加“八五”油储项目成果汇报会



在新疆塔河油田



参加中国大陆科学钻探工程开工典礼



访问韩国江原大学时在春川留影



指导博士后

賀

李舟波教授七秩华诞

舟行千里海作路
波無萬頃天為涯

羊年吉祥 劉光鼎





半世砥柱
功筆耕碩果累々

一生情洒
血喉心桃李滿園

舟波老師七秩華誕誌慶

癸未年學生何繼善恭賀



才俊毅援为人师，
做人行己为垂范。

欢庆李舟波教授70华诞

林子钰 敬贺

2003.5.9.

序

李舟波先生，山东省莱州人，1933年7月生，吉林大学教授，博士生导师，是我国现代知名地球物理学家。他是我国早期从事地球物理测井理论、方法与技术研究和系统介绍国外有关该领域理论与方法的少数学者之一。李先生1955年毕业于东北地质学院地球物理探矿系，1958年北京石油学院矿场地球物理专业研究生毕业，1981年至1983年在挪威特隆赫姆大学工学院石油工程与应用地球物理系以访问学者身份留学2年。1983年至1991年任长春地质学院副院长。曾任中国地质学会理事、中国地质教育协会理事、吉林省地质学会副理事长等职。现任中国地球物理学会理事、吉林省地球物理学会理事长。

李先生近半个世纪一直担任应用地球物理教学与科学研究工作。近20年来主要从事石油天然气储层评价的地球物理测井理论与方法研究。在碳酸盐岩储层、低阻油气储层、陆相薄互层等复杂储层地球物理测井评价方面，取得了一系列创新成果。

李先生是我国第一批地球物理测井研究生。1958年在长春地质学院负责筹建了地矿部第一个地球物理测井专业。从20世纪60年代初开始，他系统介绍国外的测井方法技术，出版译著多部，对开创中国早期数字测井工作以及之后的深化工作起到了积极的促进作用。70年代后期我国开始引进西方先进的测井技术，李先生作为主要技术骨干，参加了地质矿产部与石油部联合进行的数字测井技术引进工作。在资料准备、人员培训、设备验收和技术推广方面作了大量工作。1979年编著的《DA60-76型深井综合数字测井仪》一书，是我国第一部系统介绍数字测井仪的著作，直到目前仍然是现场技术人员的主要参考书之一。这些工作对于加速我国测井技术从模拟时代进入数字时代起到了重要的推动作用。

1981年李舟波先生赴挪威深造，在短短的两年留学期间，独立完成了《含云母及重矿物油气储层测井解释理论与方法》的研究课题，他提出的方法较好地解决了这一长期困扰北海油田测井解释的难题，得到挪威国家石油公司的高度评价。

20世纪80年代中期，我国开始第七个五年计划，塔里木盆地油气勘探出现重大突破，但碳酸盐岩裂缝分布的不均匀性和对测井参数影响的随机性给储层评价带来很大困难。李先生通过“七五”国家攻关项目提出了综合概率模型，并建立了综合解释系统，解决了准确划分裂缝带的问题。后经李先生主持的“八五”、“九五”和“十五”国家攻关项目的进一步深入研究，效果不断提高，这个方法成为目前划分裂缝带的常规手段。该方法在古潜山变质岩裂缝储层应用，也获得了显著的经济效益。

“八五”期间，李先生主持了国家自然科学基金重大项目“陆相薄互层油储地球物理理论方法研究”的二级课题——“薄互层油储地球物理测井方法与应用研究”。针对储层厚度薄和测井曲线分辨率之间的矛盾，完成了综合提高测井曲线分辨率和不同曲线分辨率匹配的研究。在大庆油田和塔里木盆地北部应用此项技术，均有效地解决了薄互层的评价问题。该项成果对于我国广泛分布的陆相薄互层的正确评价、开发与科学管理有重大的理论与经济意义。

低阻油气储层是指电阻率与水层接近的油气层，它在我国分布广泛，是长期困扰测井解

释的难题。李先生所主持的“八五”和“九五”国家攻关项目，针对塔里木盆地低阻油气储层，从理论上阐明了其形成机理，提出了泥质砂岩导电的三种孔隙水模型，并使之实用化。这是地球物理测井解释的一项重要创新，解决了塔里木盆地低阻油气储层判别和储量计算不准的难题。李先生在主持“十五”国家攻关项目期间，又进一步深入研究，不断使效果提高。

关于油气田放射性异常是否与油气藏有关，多年来一直众说纷纭，严重制约着放射性方法在油气田勘探中的应用。在自然科学基金的资助下，李先生对油气田放射性异常产生的机制进行了深入研究，通过五个油田九种类型油藏的地面和井下放射性测量数据分析，获得了油气田地表放射性异常与地下油气藏相关的证据，并提出相渗透率的差异是产生油藏边界放射性异常的成因假说，为放射性勘探寻找油气藏和圈定油气藏边界提供了理论依据。

由于测井方法与技术的迅速发展以及测井数据的高分辨率、连续性和包含丰富地质信息等特点，地球物理测井的应用领域不断拓宽。李先生为促进地球物理测井在重大科学和基础地质研究领域的应用进行了积极的探索。积极参与了我国大陆科学钻探工程地球物理测井的可行性研究，以及大陆科学钻探工程测井立项报告和工程的前期准备工作，对中国大陆科学钻探工程中地球物理测井的科学目标提出了积极建议，并被聘为中国大陆科学钻探工程科学顾问委员会委员。

李先生治学严谨，为地矿部第一个地球物理测井专业的建设和发展倾注了全部精力。已培养和正在培养博士研究生 15 名，硕士研究生 34 名，指导博士后人员 8 名。他们中间 20 余人已经晋升为教授、副教授和高级工程师，6 人进入博士后流动站和出国深造，1 名被评为国土资源部跨世纪人才。李先生周围已经形成以青年为主的实力雄厚的教学研究集体。

李先生先后完成科研成果报告及专著、译著近 20 部，发表学术论文 50 余篇。荣获省部级科技成果一等奖一项、二等奖和三等奖多项，获吉林省教学成果二等奖一项。李先生的工作得到国家充分肯定，1985 年被授予吉林省有突出贡献的中青年专业技术人员称号，1992 年获省英才奖章，1992 年获国务院津贴，1997 年获地矿部科技先进个人表彰。

李先生在科学研究中，紧密结合实际，一丝不苟。在治学授业方面重视培养学生的能力，经常深入测井现场，对现场科技人员也是言传身教，毫无保留。李先生不仅在学校，在生产部门也享有盛誉。

2003 年是李先生从事地球物理测井事业的 50 周年，也是李先生的 70 华诞。谨祝愿李先生身体健康，为测井事业作出更大贡献。

吉林大学地球探测科学与技术学院

目 录

复杂油气储层地球物理测井评价方法综述	李舟波 (1)
天然气水合物的研究现状与测井评价	王祝文 李舟波 刘菁华 等 (8)
二氧化碳气藏的勘探开发及测井评价	房德斌 潘保芝 (18)
充电法的研究现状及进展	陈丽虹 (27)
国内电阻率层析成像反演方法综述	董瑞霞 范晓敏 (33)
论钻孔电磁波法中的几个天线问题 (I)	孙建国 (39)
套管井中有限尺寸线圈的电磁响应特征分析	沈金松 (46)
多频电磁波测井的数值模拟和实验研究	刘四新 佐藤源之 (57)
钻孔电磁波法在探测地下岩溶中的技术及应用	康国军 赵淑芬 王志学 (66)
大地电磁测深方法光滑模型反演原理	翁爱华 刘国兴 (71)
应用 HOUGH 变换识别和定量评价裂缝	陆敬安 吴志芳 刘树坤 等 (77)
成像模拟并在裂缝评价中的应用	傅永强 伍 东 毛传芳 (82)
应用小波分析方法提取声波全波测井记录中的模式信息	范晓敏 李舟波 (88)
塔河油田碳酸盐岩储层胶结指数的分布特征研究	莫修文 李舟波 翁爱华 (93)
脉冲中子衰减—能谱 (PND-S) 测井技术在塔河油田中的应用	仵岳奇 李桂荣 马立新 (100)
电缆地层测试器的三维有限元模拟	周 波 陶 果 (110)
高压地层测井解释方法研究	文环明 肖慈珣 李 瑞 等 (116)
含钙砂泥岩薄互层测井处理系统 TBLAS 及其应用	潘保芝 李舟波 汪宏年 (128)
安棚深层系低孔低渗储层的测井评价	张宇晓 李玉玲 (136)
基于 VC++ 的 MAPGIS 二次开发在油气勘探数据管理中的应用	李 河 李舟波 王祝文 (144)
基于三层体系结构测井储层评价系统研究	曹旭光 翟慧杰 李舟波 (151)
油田高含水后期多资料综合研究	王树明 隋新光 隋凤芝 等 (156)
分形插值方法与应用	李庆谋 (162)
基准面旋回分析及其应用——以大港油田港中南一断块为例	薛林福 潘保芝 王钦军 等 (173)
电化学导流法提高原油采收率试验研究	易 兵 董启山 董瑞春 等 (182)
往复式压缩机基础动力参数测试与分析	宛新林 席道瑛 高尔根 等 (188)

复杂油气储层地球物理测井评价方法综述

李舟波

(吉林大学地球探测科学与技术学院)

摘 要 文中首先对地球物理测井在油气勘探中的作用和地位做了简要的叙述。在分析测井响应与储层地质特征相互关系的基础上,指出在现有技术条件下仍属于评价存在一定困难的复杂储层。接下来对薄储层、低阻油气层、碳酸盐岩裂缝—孔洞型储层和岩性复杂储层等几种复杂储层分别讨论了造成复杂的原因,介绍了当前已采取的技术措施,以及还存在的问题。

一、引 言

按不同尺度,油气勘探对象可划分为沉积盆地、含油气区带、圈闭和油气藏等。于是,盆地分析评价方法、圈闭描述评价方法和油气藏评价方法构成油气勘探工作的核心。在不同勘探尺度或阶段,不同勘探方法发挥着不同的作用。在油气藏评价阶段,地球物理测井发挥着特别重要的作用,因为它可以快速给出连续的、高分辨率的和定量的地层在原位条件下的各种信息。根据地球物理测井结果求出的孔隙度、饱和度和渗透率等储层参数,是计算探明储量和估计产能的基本依据。

我国油气资源不仅在地域上分布广泛,而且储层的地质时代跨度很大,从第三系到前古生界地层中均已发现工业油气藏。遇到的储层类型多样,包括一些在现有测井技术条件下难以准确评价的复杂储层。

研究复杂油气田评价技术和非均质复杂油气藏测井技术,对于提高油气资源探明程度和油气采收率有重要意义,并为国家油气资源安全保障提供有力技术支撑。因此,我国在2001~2010年可持续发展科技纲要中已将其列为重要任务和领域的一部分。

二、测井响应与储层地质特征的关系及复杂储层的概念

地球物理测井是通过对钻孔中的天然和人工地球物理场的观测,来研究周围地层的物理性质,进而解决储层评价等地质问题和相关工程问题。钻孔中地球物理场是周围一定范围内各种因素,包括地层的岩性、岩石结构和构造、孔隙流体性质和数量,以及钻孔条件如井径、钻井液和钻井液侵入带等的综合反映。此外,地球物理测井响应还和测量的技术条件有关。图1是测井响应与各种影响测井响应的因素之间关系的简单示意图。

假如测井技术条件选择恰当,并且井眼环境因素可以通过适当方法加以校正,则测井结果只和储层的固体和流体的成分和数量,以及地层的结构和构造有关,或者说只和储层的岩性、储集性、含油气性有关。通常把储层的物理性质、岩性、储集性和含油气性称为储层的四性。评价油气储层的地球物理测井方法就是根据测井得到的物理性质去求取另外的三性。可以看出,四性关系的研究状况直接决定着测井能解决储层评价问题的程度。由于测井响应是岩性、储集性和含油气性的综合反映,在研究其中一种性质时,其它性质将是干扰因素。

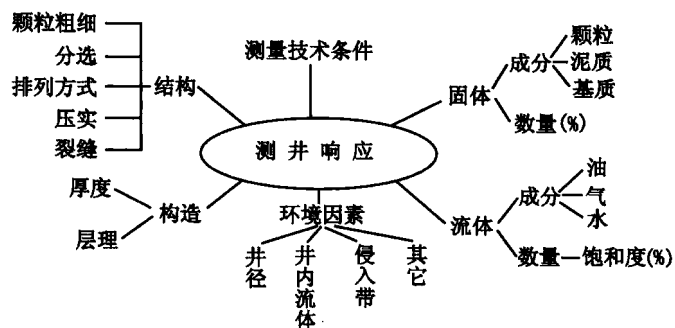


图1 影响测井响应的各种因素

Fig.1 The factors affecting the logging responses

复杂的问题可能变得简单。另外，随着勘探领域的扩大，还会出现一些新的复杂油气储层类型，要求研究新的方法和技术去解决。科学技术正是在这种客观需求的推动下不断向前发展。

就目前地球物理测井方法技术的发展水平，薄储层、裂缝—孔洞型储层、低阻油气层和岩性复杂储层，仍属于复杂油气储层。当然，在不同地区的具体地质条件下，复杂程度是不同的。

一般来说，地球物理测井是一种间接的方法，是通过井内物理场的观测结果反演出地层的物理性质，然后根据储层的地质—物理模型推测出储层特征。由于环境影响因素、测量误差、解释参数误差、模型不够精确，以及地球物理反问题解的非唯一性，也会给储层评价带来困难。因此，需要根据不同储层类型建立的解释模型，综合应用多种方法才能得到比较可靠的结果。

三、薄 储 层

在陆相含油气盆地，一些薄砂岩储层往往具有很高的产量，已逐渐引起人们的注意。利用地球物理测井数据对储层进行评价时，在厚层情况下，只要适当加大探测深度就可以消除井眼和侵入带的影响，获得地层真实参数；在薄层情况下，除了井眼环境影响之外，邻层对测井结果的影响成为突出的问题，面临着既要获得地层真实的物理和储集参数，又要把层清楚划分出来这样两个相互对立的要求。这不仅给仪器设计提出了尖锐的挑战，同时也对数据处理与解释理论和方法提出了更高的要求。根据测井数据进行储层评价是一个综合性的复杂工作，所要确定的是一组参数，如岩性、孔隙度、渗透率、流体饱和度等，因此使用的测井方法也是一个系列，包括岩性测井组合、孔隙度测井组合、流体饱和度测井组合等。由于各种测井方法受环境影响的程度和方式并不相同，因此处理的方式也有所区别。对于岩性和孔隙度测井来说，侵入带的影响相对较小，重点是消除井眼影响和提高分辨率以消除邻层影响；而对于饱和度测井组合来说，侵入带和邻层的影响则都很重要。所以难度也更大些。

为了解决薄层问题，在改进仪器性能的研究方面取得了一些进展，如高分辨率双感应测井仪（Strickland B. 等，1987）、高分辨率侧向测井仪（Khokhar R W, Johnson W M, 1989）和高分辨率声波测井仪等，对于提高测井分辨率都见到了明显的效果。高分辨双感应测井仪的分辨率可以达到侧向测井仪的水平（0.6m 厚的地层可以划分出来，0.9m 厚的地

层可以准确评价), 探测深度比通常的双感应测井仪深 40%。高分辨率侧向测井仪 (TBRt) 的分辨率可以达到微电阻率测井仪的水平, 而探测深度达到 0.3~0.5m。高分辨率声波测井仪由于采用小间距 (0.15m), 使分辨率大大提高。

为了得到高分辨率的曲线, 在数据采集过程中需要加密采样间距、降低测速和减小核测井仪积分电路的时间常数。

提高测井曲线纵向分辨率的另一个重要方法, 是利用数据处理技术来实现。先后出现了各种反褶积方法 (如正则反褶积、卡尔曼反褶积、贝叶斯反褶积、最大熵反褶积等), 用来提高具有或近似具有线性响应仪器的数据, 如声波、自然伽马测井曲线等; 匹配滤波与非线性拟合技术, 用于提高响应函数不仅与探头结构和相对位置有关, 而且还随地层物理性质变化而变化的测井曲线, 如侧向测井曲线; 对于双探测器的补偿中子和补偿密度测井仪也提出了一些分辨率补偿的办法, 如所谓 α 处理方法等。

由于存在探测深度和分辨率两个相互对立的要求, 测井仪器分辨率的提高受到很大限制。因此, 在继续研制具有高分辨率测井仪之外, 从理论和实用两个方面考虑, 系统地研究和开发提高分辨率处理方法同样具有重要的现实意义。

对于厚度在 0.3~0.6m 的薄层, 经过提高曲线分辨率处理之后, 就可以按常规方法进行解释。对于小于 0.3m 的薄层, 目前只能借助经验的办法定性评价。厚度很薄的纹层是以交互层的形式出现, 往往表现出各向异性。这时不仅评价储层参数有困难而且物理参数的确定也面临挑战。目前, 对各向异性问题的研究已引起重视。

四、碳酸盐岩裂缝—孔洞型储层

碳酸盐岩储层的储集空间类型复杂多样, 其中裂缝—孔洞型储层储集空间的形状和分布十分复杂, 并具有很大的随机性和不同孔隙类型同时并存的多重性, 严格说这种储层并不是层而是形态复杂的储集体, 使测井响应与储集性之间的关系变得非常复杂。在砂泥岩剖面上, 只要划分出渗透性砂岩, 就解决了储层识别问题, 而在致密的碳酸盐岩剖面上, 则必须划分出裂缝和孔洞发育带才能解决储层识别问题。根据测井资料划分裂缝和孔洞发育带有两类方法, 一类是井壁成像测井, 如声波井壁成像和微电阻率扫描成像; 另一类是利用各种常规测井方法建立的综合判别技术。成像测井的优点是可以直观显示裂缝和孔洞的位置和分布特征, 但受分辨率的限制, 不能清楚显示微裂缝, 有时还受到一些假象的干扰。常规测井的综合方法可以充分利用各种方法, 包括裂缝信息消除干扰和减小多解性, 达到有效识别裂缝和洞发育带的目的。例如, 在塔里木盆地北部普遍使用的综合概率模型。由于常规方法的综合识别技术是依据统计方法建立的, 受已知样本数量和精度的限制, 并有一定的地区局限性。因此, 上述两类方法往往同时使用, 互相补充和验证, 以便达到有效划分裂缝和孔洞发育带的目的。

目前, 对碳酸盐岩裂缝性储层评价所采用的解释模型还显得过于简化, 所以参数计算结果的精度还比较低。另一个难题是储集体的空间展布还没有有效的追踪方法。

五、低阻油气层

目前, 对裸眼井油气储层含油性的评价主要是依据岩石的导电性或电阻率。所谓低阻油气层是指其电阻率与水层电阻率难以区分的油气层, 它是一个相对的概念。简单情况下, 孔隙裂隙储层的岩石导电性主要由孔隙中地层水的导电性决定, 并可以用阿尔奇公式表示, 即

含水岩石的电导率 C_0 与孔隙水的电导率 C_w 之间是线性关系；含油地层的电阻增大率 RI（电阻率指数）与含水饱和度 S_w 之间在双对数坐标系中为线性关系。最先被注意到不满足上述线性关系的岩石是泥质砂岩，其电阻增大率随含油饱和度的增加，增大的速率减慢。泥质砂岩的这个特点被认为是由泥质的附加导电性引起的。几十年来围绕泥质砂岩提出了多种导电模型。初期，泥质体积模型占优势，认为附加导电性是和泥质体积含量多少有关。这种模型只能针对局部地区的地质特点建立适当的经验关系，不能全面地说明 C_0 与 C_w 和 RI 与 S_w 之间的非线性关系。到 1968 年 Waxman 和 Smits 提出粘土矿物阳离子交换能力 Q_v 产生附加导电的偶电层导电模型，在理论上说明了上述非线性与附加导电性、温度和孔隙流体矿化度的关系。Clavier 等（1977）进一步研究注意到，Waxman—Smits 模型不能解释泥岩中抽出的水具有比较固定的矿化度，并且不同于相邻砂岩中水的矿化度；一些粘土以外的因素也可以造成高的阳离子交换能力，但不造成附加导电现象。为了解释这些现象，对 Waxman—Smits 模型进行了修改和补充，提出了双水模型。同时还解决了 W—S 模型中的 Q_v 值不能根据测井方法直接确定的困难。于是，双水模型得到了广泛应用。

随着研究工作的深入，又陆续出现一些新的问题，Diederix（1982）通过实验研究发现，表面粗糙的纯砂岩由于孔隙具有双峰分布，也表现出泥质砂岩某些特征，RI 和 S_w 之间的关系在双对数坐标中呈非线性。Swanson（1985）在研究含大量高岭石（低阳离子交换能力黏土）和燧石的岩样时发现，微孔隙对电阻率有相当大的影响，也使 RI 和 S_w 之间在双对数坐标中表现为非线性。岩石在不同含水饱和度时，其电阻率受不同尺寸的孔隙控制，导致 RI— S_w 关系中的饱和度指数 n 发生变化。在低含水饱和度时，尤其在低矿化度孔隙水条件下，Waxman—Smits 模型的结果与实验数据明显不同。Swanson 认为微孔隙水是原生孔隙系统中自由水和粘土水之外的第三种导电因素，而且粘土矿物与非粘土矿物都可以造成微孔隙。

Brown（1988）对 Waxman 和 Smits 的泥质砂岩实验室分析数据进行了重新评价，也显示了除了阳离子交换能力形成附加导电性之外，还有另外的导电因素。此外 Worthington（1985），Crane（1990），Herrick（1993）等的研究也得到类似的结论。

为了更精细地描述泥质砂岩的导电特性，相继提出了一些不同的导电模型。Givens（1988）提出一个所谓骨架导电模型 GCRMM，认为除自由水和粘土吸附水之外，微孔隙中受毛细管作用的束缚水和导电矿物都可以造成骨架导电，并且粘土水和毛细管束缚水具有相同的导电路径。Berg（1996）和 Kuijper 等（1996）分别提出有效介质 HB 和 SATORI 模型。Crane（1990）提出一个扩展的阿尔奇方程考虑微孔隙影响，如假定微孔隙的 m 和 n 为 2.2，大孔隙的 m 和 n 为 1.8 则与 Swanson 含微孔隙的燧石岩样实验结果相符合。1999 年 Brown 提出一个双阿尔奇模型（BAM）用于描述微观尺度上有两种或多种孔隙形态的岩石导电机制。总之，近 20 年来的研究对于含泥质砂岩导电因素除自由水、粘土水之外应包括微孔隙水已基本取得共识。在确定三种孔隙水的相对比例，以及影响三种导电因素导电路径的 m 和 n 值的研究，已取得初步成果。

六、岩性复杂储层

岩性复杂是指岩石骨架矿物成分复杂多样而且是变化的。化学成熟度很低的杂砂岩、变